

大型造波水路・造波機械の構造設計

応用理化学研究室長 村 木 義 男

要 旨

昭和 32 年度、計画に着手した開発局懸案の大型造波水路も、その後予算などの問題で多少困難をとまなつたが、ようやく昨 34 年度施工のはこびとなり、このほど一応の完成をみたので、その規模、方式、機構、構造について報告する。

1. ま え が き

最近海岸工学の分野で特に重視されてきた防波堤や海岸護岸、防潮堤などの越波と跳波の問題、構造物に仿く波圧や基礎洗掘の現象は、波と流れの性質を併せもつ波から流れへの過渡的現象で非常に複雑である。これを模型実験的に解析するには、できるだけ大きな模型により現象を再現させることが必要であり、その限度は実験波高 30 cm 以上、縮尺度最小限 1/20 と考えられている。

現在北海道の港湾工事はほとんど建設途上にあるといつてよい。大は函館港のごとき重要港湾を始めとし、苫小牧工業港、各地の地方港湾、小は漁港にいたるまでほとんどが計画中のもの、施工中のものである。これら多

くの工事の設計を強力に推進するには、諸種の資料なかならず混成堤マウンドにおける捨石、テトラポットの安定性の問題、コンクリート方塊などの噛み合わせの問題、堤体の基礎洗掘、各種構造物の天端高、堤体に作用する波圧分布に関する資料が必要で、これを得るため前記したようなスケールの大きな実験のできる大型造波水路の建設が計画されたのである。

本水路の実際の設計に当つては、大型なるが故の設計上の諸問題、予算不足の問題など困難を伴つたが、幸い運輸省技術研究所と建設省土木研究所にこの種大型水路ができていたので、これを参考に以下に述べるような方式構造の造波水路を設計した。

2. 既存大型造波水路の概要

この種大型造波水路の世界各国の例を示すと表-1 のとおりである。40~60 m のものが比較の数が多く、100 m 以上のものは独乙に 1、米国に 2 という程度で、わが国の運研の 105 m、土研の 112 m はいずれも大型の中でもさらに大型の部類である。当試験所の 73 m も、この

表 - 1

国 名	水路の形状寸法 長さ×幅×深さ (m)	実験波高 (cm)	造波機出力 (HP)	造波機の型式	備 考
独 逸	120×2.2×1.5	36	6	プランジャー型	水路、最近完成
"	40×0.6×1.0	15	4		水路、最近完成
瑞 典	60×3.0×1.5	25	15	吊 下 げ 式	水 路
米 国	190×4.5×6.0	180	500	ピ ス ト ン 式	水路、最近完成
"	100×45.0×0.9	20	50	ピストン式可動	水 槽
"	60×2.4×1.8	30	15		水路、最近完成
"	45×2.4×0.6	10~15	5		水 路
"	36×(1.5+1.5)×1.5	25	5	スコップ型フラップ式	水 路
仏 国	60×1.2×1.3	30~40	11	ベンドユラム型	水 路
"	40×4.0×1.21	30	15	ベンドユラム型	水 槽
"	40×0.6×1.3	30	4	ベンドユラム型	水 路
英 国	36×24.0×0.75	—	—		水 槽
日 本					
運 研	105×3.0×2.5	50 (発生波 70)	75	ベンドユラム型	水 路
土 研	112×1.5×2.5	70	30	吊下げ型ピストン式	水 路
本 水 路	73×1.8×1.8	40 (発生波 60)	35	ベンドユラム型	水 路

(運輸技術研究所報告. Vol. 7, No. 11; 土木技術資料. Vol. 1, No. 7, '59 による)

表からみればかなり大型の部類に属す。施設が大きいほど実験の精度は確かに高くなるが、一方実験に要する時間、経費、人員などを考えると廻転能率が悪く、また建設費も莫大になるから表中の数の多い 60 m 位のところがかえつて実用的ともいえる。この意味で当試験所の 73 m も実用的能率的であろうと期待している。

表-1 の各国水路その他の資料から、一応型式を分類してみると次のとおりである。

水路型式 ① 還流考慮せず……単水路

② 自然還流方式……パイプによる連通、復水路

③ 強制還流方式……ポンプによる強制還流
造波型式 ① フラッター型

② ピストン型

③ プランジャー型

④ 減圧式

⑤ ペンジュラム型

⑥ サーペント型

⑦ 偏心ローラー型

次に運研と土研の造波水路について若干説明する。(運研造波水路については運研報告 Vol. 7, No. 11, 土研については土木技術資料 Vol 1, No. 7 を見られたい)

運研の大型造波水路は長さ 105 m (有効長 80 m)、幅 3 m、深さ 2.5 m の鉄筋コンクリート半地下式で、ポンプによる強制還流方式を採用している。すなわち、水路の模型設置箇所の背部と造波機設置部分とを地下埋設パイプで連結し、防波堤を越えた水をポンプで強制的に元にかえしている。観測窓は約 6 m である。造波機構にはペンジュラム型を採用しており、支柱の下部支点を移動させることによりフラッター型、ピストン型、ユニバーサル型いずれにもなる機構である。動力系統は 75 HP のモーターの回転がプーリー、ヘルショウポンプ式無段変速機、歯車箱 (変速歯車、増速歯車、差動歯車) フライホイールなどを通して最終減速歯車に導かれ、これが二重偏心装置およびレバーにより直線運動に変えられ、拡大レバーにより前記ペンジュラム造波機構に連絡されている機構である。造波板の振幅は二重偏心装置で、周期はヘルショウポンプと切替ギヤの組合せで調節される。造波板の最大片振幅は 1.3 m である。発生波高は最大 70~80 cm、周期は 1~7 秒である。

土研の造波水路は長さ 112 m (有効長 86 m)、幅 1.5 m、深さ 2.5 m (観測部 3 m) の鉄筋コンクリート製半地下式で還流は考えていない。発生した波が模型にあたり、反射して再び造波板に到来する間の幾つかの波について実験を行なうという立場をとっている。観測窓は 6.5 m で

ある。造波機構は吊下げ式でピストン運動のみ可能である。動力系統は 30 HP モーターの回転がプーリー、無段変速プーリー、プーリー、フライホイール、自動車用変速機、減速歯車を経てクランクホイールに伝わり、ここで回転運動が直線運動に変換、拡大柱を経て吊下げ式造波機構に連絡される機構である。造波板の振幅はクランクホイールの偏心量で、周期は無段変速プーリーと自動車用変速機で調節される。造波板の最大片振幅は 80 cm である。発生最大波高は 70~80 cm で周期は 1~5 秒である。

ここで両者の造波水路を考察してみる。運研方式では、水路についていえば、越波量測定の必要でない一般の実験にも常にポンプを用いて調節しながら還流することはわずらわしい上に維持費もかさみ不都合のように思われる。造波機構についていえば、ペンジュラム方式であるから実験波を現地波に十分合わせられる点都合よいが、動力系から造波板への拡大率が 16.5 倍で非常に大きいこと、それに関連して偏心量が最大 8 cm で小さいこと、二重偏心機構という特殊な装置を採用しなければならない点機械作動として何か無理な感じがもたれる。

土研方式ではすべてシンプルな立場で設計している。還流方式を採用していない点連続実験の可能性において難点があり、吊下げ式造波機構がピストン型専用である点不足を感じる。拡大率が 2 倍で小さく、最大偏心量が 40 cm で充分大きい点、また無段変速プーリーと自動車用変速機との組合せによる変速機構が全体をシンプルにし、機械的作動に無理がないように考えられる。

以上述べた両研究所の水路を参考に、当試験所独自の手法も取入れ本水路を設計した。なお、馬力の計算、振幅の計算など、計算方法はほとんど運研報告 Vol 7, No. 11 によつた。

3. 設計条件と方式の選定

(1) 模型波諸元の決定

設計上最も基本となるものは模型波の諸元である。前記したとおりこの種造波水路としては縮尺度 1/20 以上、実験波高 30 cm 以上が要求される。我々が実験を対象としている道内の港は大きな重要港湾から小さな漁港まであるが、実験の要求のあるのはむしろ地方港湾、漁港の場合の方が多いと判断される。そこで我々は比較的小さな港については縮尺度 1/10、大きなものについては 1/20 の実験を行なう立場をとつた。

北海道沿岸の現地波は波高 0~8 m (15 号台風)、周期 4~18 秒とみればよい。これを模型波になおすと次のとおりである。

	波 高			周 期		
現 地 波	0	4	8m	4	9	18 秒
縮尺 1/10 模型波	0	0.4	0.8	1.25	2.8	5.6
〃 1/15 〃	0	0.27	0.53	0.98	2.3	4.6
〃 1/20 〃	0	0.2	0.4	0.9	2.0	4.0

この表から模型波の諸元として実験波高 40 cm, 周期 1~6 秒をとれば, 我々が対象とする港の実験はすべて縮尺 1/10~1/20 内で行なうことができることになる。後でのべるように水路には濾波装置を使用するので, これによる損失を 30% と考え結局発生最大波高として 60 cm が必要となる。従つて所要模型波の諸元として次のように決定した。

発生最大波高……60 cm

実験最大 〃 ……40 cm

実験波 周期……1~6 秒

(2) 設計条件

設計条件を列記すれば次のとおりである。

- i 発生最大波高 60 cm, 実験最大波高 40 cm, 周期 1~6 秒。
- ii 波高 0~最大, 同期 1~6 秒の間連続的にかえられること。
- iii 波形, 水分子運動を現地のそれに十分合致できるような造波機構とする。
- iv 長時間の連続実験可能なこと。
- v 越波量の測定可能なこと。
- vi 施設の取扱い, 維持管理容易なこと。
- vii 冬期実験可能なこと。
- viii 建設費安価なこと。

(3) 方式の決定

上記した設計条件をみたすため次のような方式に決定した。

- i 水路は複水路方式とし, その一方を造波水路, 他方を還流水路とし, 通常の越波量測定を伴わない実験にあつては自然還流方式で使用し, 越波量測定必要の時は還流水路を造波水路と水密的に隔離し, ポンプにより強制還流を行なう。
- ii 造波機構には造波板運動型式の可変な運動型ベンジュラム型を採用する。
- iii 動力系統にはシンプルで建設費の安価な土研方式を採用する。
- iv 上記造波機械と動力系統との連結部分すなわち, クランク, 偏心, 拡大機構には倍率の小さい, 機構の簡単な新たな独自の方法を設計する。
- v 水路は冬期の凍上などを考え半地下式とする。また上屋は防寒構造とし水路全長に設ける。

4. 水路の構造

(1) 水路の規模の決定

水路の寸法は長さ内法 73 m, 幅内法 1.8 m (造波水路) +0.8 m (還流水路) 深さ内法 1.8 m (観測部 2.3 m) である。長さは模型波の大小にかかわらずできるだけ長い方がよいが, 我々の場合敷地の関係で許される最長 73 m をとつた。

幅は現地の到来波の幅とケーソンの長さから決められる。うねりの場合は非常に長いのでこれは一応別とし, 普通の場合風波では 50 m 位あるからその 1/10~1/20 では 5~2.5 m となる。一方ケーソン 1 個の長さは大きなもので 20 m, 普通 10 m 前後とみればよいから模型にすれば 20 m もので 2~1 m, 10 m もので 1~0.5 m となる。模型実験において, できるだけ Boundary condition を現地のそれに合わせようことを考えると, 例えばケーソンの実験では, ケーソン 3 個を据付け, 真中のケーソンについて実験を行なえば理想的である。このような考えに基けば, 1/10~1/20 の実験を行なうには幅として 6 m 必要となる。上記のことを総合して結局幅としては 5~6 m が理想となる。波を一応除外視しケーソンの大きさのみを考え, しかも 10 m ケーソンのみを対象としても 3 m は必要となる。最小限の考え方として, 中央の実験対象のケーソンのみ正規の縮尺もの 1 m とし, 両側のそれは単に Boundary condition を整える意味で短いものをそえるということにすれば大体 1.6 m 位あればよい。上記したことの外に波に対する壁の摩擦ということもあり水路幅はなるべく広い方がよいが, 広いとそれだけ造波機械の規模が大きくなり建設費が莫大なものとなる。我々の場合, 上記最小限の考え方で, 一応延長計画も考慮, 予算内最大限の幅 1.8 m と決定した。還流水路の幅は越流量に関係するが, これも理想状態を考えればかなり広いものとなるので, 実験の最も多い場合をとり 0.8 m と決定し, まかない切れない場合は模型底部にパイプを通す方法を併用することにした。

深さは, 現地水深 10 m 前後の場合が最も多く, これの 1/10 模型では 1 m となるが, 海底地形, 勾配, 最大波高発生に必要な造波板の水深, 大きな港の場合の水深 15~20 m の実験, 将来の拡張, 予算など考慮して水深最大 1.4 m とし, それに半波高を加え, 水路の深さは 1.8 m と決定した。観測窓の部分は波の衝突によるはね上りを考慮し, 50 cm 高くし 2.3 m とした (土研方式)。

(2) 一般構造

水路の一般構造を図-1, 図-2 に示した。水路は大きく別けると造波水路と還流水路とからなる。造波水路は造波部, その背後の消波部, 前方進行部 (有効部 48 m)

模型設置部(観測窓部)、模型背部、消波部からなっている。これに附帯して機械据付台①、②、水位測定室⑦③カ所、観測地下室④、観測窓⑤がある。還流水路は有孔隔壁または溢流堰⑥、隔壁⑦、矩形堰⑧、還流本水路、貯水槽④、還流潜孔⑤からなる。

造波部に設置された造波機構(図-3参照)は機械据付台①に設置された動力により波を発生し、その背面の波は消波装置(傾斜面に碎石をのせたもの)により消滅する。前方方向の波は途中の濾波装置により波形を整えられ前進し模型設置部に設置され模型に到来する。ここで生じた諸現象を測定したり、観測窓(6m×2m)により写真観測したりする。ここで模型により反射された一部の波は造波機の方向に逆進し、途中濾波装置を通つて造波板に達する。この波は再び造波板で反射し、新たに起きた波とともに模型に向つて前進する。この際濾波装置により前進波高が約70%まで減衰するが、反射波は2回多く濾波装置を通過するので連続実験を行なつた場合、模型部分における到来波に含まれる反射波の割合は、ほぼ10%におさえられることになる。

一方模型を越えた波は模型背部(港内に相当する部分)を攪乱するが、これは消波装置により消滅する。その増加した水量は、越流量測定しない場合は有孔隔壁⑥を通つて還流水路に入り貯水槽方向に流れ還流潜孔⑤を通つて造波水路に還元する。

越流量を測定する場合は、還流潜孔をすべて密閉し、還流水路内水位を下げ、⑥に溢流堰を設けて模型背部の水位をほぼ一定に保つようにし、これから溢流した水量を隔壁⑦を通したあとで矩形堰⑧の溢流水深により測定する。溢流した水は貯水槽に流入し、ポンプにより造波水路に強制還元される。

有効長は48mで、周期6秒水深1mの場合波長約18mであるから、2.5波、最も多く使はれる周期3秒以下では水深1.4mで波長10m以下であるから約5波入ることになる。水路には全長レーガが敷かれ波高その他の観測、模型その他材料の運搬に使用される。

図-2に水路の主要断面を示した。これに示しあるとおり壁厚底厚ともに20cmである。

(3) その他工事に関する事

観測窓はできるだけ大きくとるようにし、100cm×97cm×12mm、85cm×97cm×12mmの強化ガラス各6枚をもつて6m×2mの大ききとした。また窓枠はアングルとチャンネルを組合せて十分過ぎるほど頑丈なものにした。

水路工事に特に留意した点は、水路の寸法をできるだけ厳格にし、壁も垂直を十分に保ち、内壁面を滑らかに

仕上げ、目地その他水密に注意したことである。このため型枠は特に大きなもの(6×12尺)を用い、水路内壁に使用するものにはサニーボード(3.5mm厚3×6尺)をはりつけて板目をなくし、継目をできるだけ少なくするよう施工した。仕上り壁面はかなり良好なものである。

上屋建築は34年度は予算の関係で観測室と機械室のみとし、中間部は35年度に実施する。つくりはパイプトラス構造、モルタル外装で一応防寒構造としてある。

5. 造波機械の構造

(1) 所要馬力、振幅

造波機械設計の基本になるものは所要馬力と造波板の所要振幅であるが、これらの計算は連研報告(前記)によつて行なつた。

波高60cm、周期6秒、水深1.4mとして最大所要馬力を計算すると理論値として30IPとなる。これに機械の効率を考え実際の最大所要馬力は40IPと決定した。機械効率のとり方によつてはこの値より大部大きくなるが、この最大馬力を必要とする実験は極く稀であり、またこのような機械設計はいわゆる安全係数としてかなり大きなものをとるのでこの安全係数内で間に合うものと考え、予算の関係もあつて前記40IPと決定した。

振幅は計算の結果、水深50cm、周期6秒の波(実際には非常に稀にしか使用しない)でピストン型で水面片振幅80cmあれば目標の60cmの波は発生し、水深1m、周期3秒の波で、フラッター型で水面片振幅80cmあれば60cmの波が発生する。

これに若干の安全をみ、さらに機構設計上の問題も考慮して造波板の上端最大片振幅を1mとした。我々が多く対象とする模型波の周期はいずれのタイプでも2~4秒であり、実際にはフラッター型では表面波またはこれ

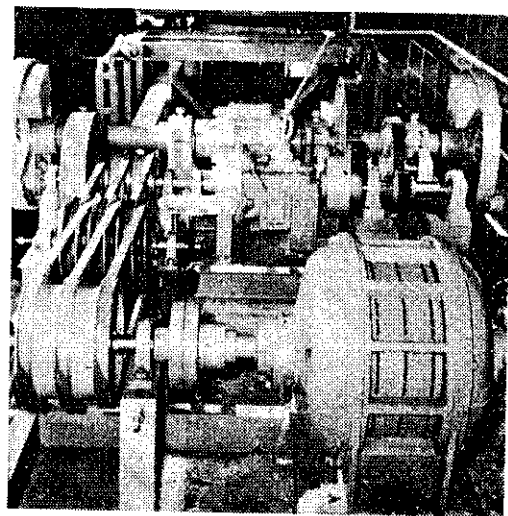


写真 1 造波機動力伝達機構

に近い波で周期が短く水深が比較的深い場合に用い、ピストン型では長波またはこれに近い波で、周期の比較的長い水深の浅い場合に用いるので前記の条件より有利である。ちなみに、実際に使用されている両研究所の造波機の最大振幅を示すと、運研では最大片振幅 1.3 m、土研ではピストン型専用で最大片振幅 80 cm で双方に差はあるが、いずれも最大 70~80 cm の波を発生し実用に供しているの、我々の最大片振幅 1 m はまず確信のもと

る値と考える。なお、造波板にかかる最大荷重は 1 ton とした。

(2) 一般構造

方式決定のところで述べたように、動力系統に土研方式を、造波リンク機構に運研方式を、クランクなど中間機構に独自の方法を用いた。各部の説明は次項で述べることにし、ここでは一般作動機構について記す。

図-3 に一般構図を示した。モーター① (35 HP) の回転

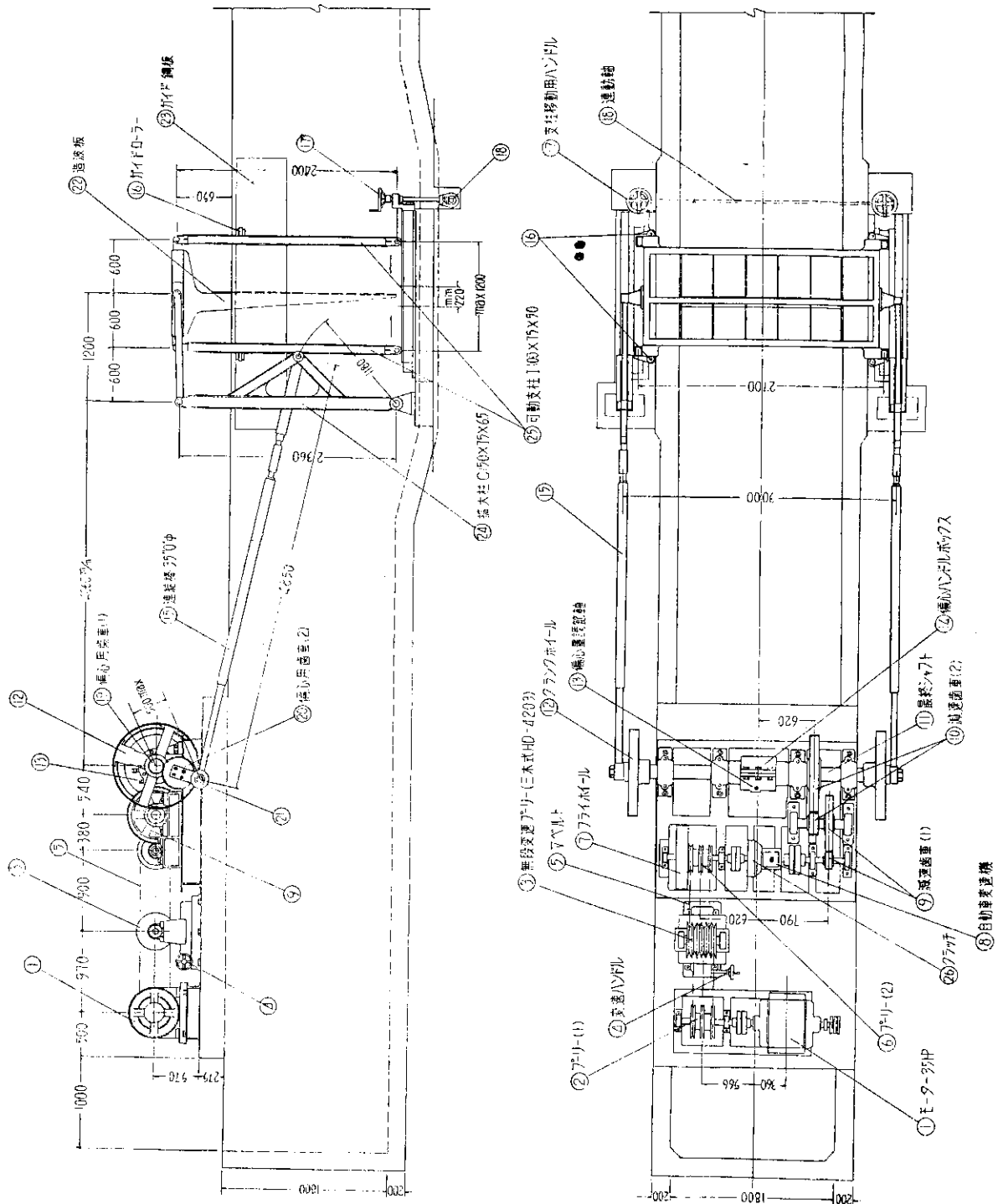


図-3 造波機械一般構造図

はカップリングを経てプーリー②に伝達される。プーリー②には3本のVベルトがあり、無段変速プーリー③と、これとは別にVベルト⑤により無段変速プーリー③とプーリー⑥とが連結され、回転が伝達される。プーリー⑥の片側にフライホイール⑦がある。回転はカップリング、クラッチ②を経て自動車用変速機⑧に伝えられ、減速歯車⑨と⑩により所要の回転数となつて最終回転軸⑪に伝えられる。最終軸⑪の両側に特殊な構造をもつた

クランクホイール⑫があり、これに連結棒⑬が左右同一偏心量を保つて連結されている。ここでクランクの回転運動は連結棒の直線運動にかえられる。一方造波リンク機構は、下部支点の固定された拡大柱⑭と下部支点の可動な可動支柱2本⑮、造波板⑯とからなり図-4に示した軌跡を描くよう連結されている。前記した連結棒の直線運動がこの造波リンク機構に図のように連結され、造波板の前後運動となる。

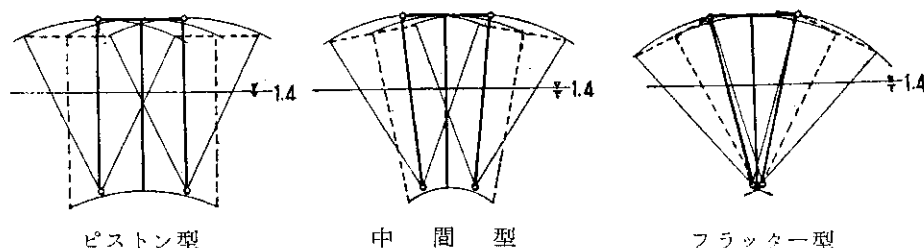


図-4 造波板軌跡図

波の周期調節は運転中停止時にかかわらず、自動車用変速機⑧のレバーと無段変速プーリーのハンドル④の組合せ操作により行なわれる。自動車用変速機は4段切替であるが3段を使用している。普通は安全のため運転中に周期の比較的長い方から順次短い方に調節する。

波高の調節は、停止時において、両クランクホイール⑫についているボルトをゆるめ、偏心量調節軸⑬にハンドルを付け、これを回転することにより行なわれる。1個のハンドル操作により左右同一量同速度で偏心させられる。

造波板運動型式の調節操作は、支柱移動用ハンドル⑩を回転することにより行なわれる。すなわち⑩を回転することにより左右の可動支柱⑮の4支点が同一速度で内側にあるいは外側に移動し任意の運動型式を形成する。

なお、左右の可動支柱には横振れを防止するためのガイドローラーがついている。

(3) クランクおよび偏心機構

前記したとおり動力系統に土研方式を、造波リンク機構に運研方式を採用したが、これを組合せるのに一つの困難に直面した。すなわち、両者を拡大率の小さい、偏心量の大きい土研方式で連結することは機構上極めて困難であり、運研方式を採用すれば拡大率非常に大きくなり、また必然的に二重偏心機構を使用せざるを得なくなる。これは機械的作動の面からもまた経費の面からも避けたい。そこで我々はクランクホイールを両側に設け、偏心を与える前に伝達を予め二つに分ける方法をとった。これは一見不都合のようにみえるが、非常に有利な点をもっている。その一つはいうまでもなく機構が簡単

になり、拡大率を十分小さくとることができ、また偏心量を十分大きく (50 cm) とつて調節精度をよくすることができる点であり、いま一つは、両クランクで造波板にかかる荷重を支えるので、クランク軸の受ける力が1/2ですみ、設計がらくになりしかも安全である点である。しかしこの方法で一つの問題が生ずる。それは、クランク1個の場合は偏心調節も1箇所であるから造波板の運動は常に左右同一であるが、この方法では左右別々になっているから、両者の偏心量を常に同一に保つことが必要になる。左右の偏心量調節を別々に行なうことはやつかいであり、万一同一でなければ機械を破損することになるので、我々は両クランクの偏心量を一つのハンドル

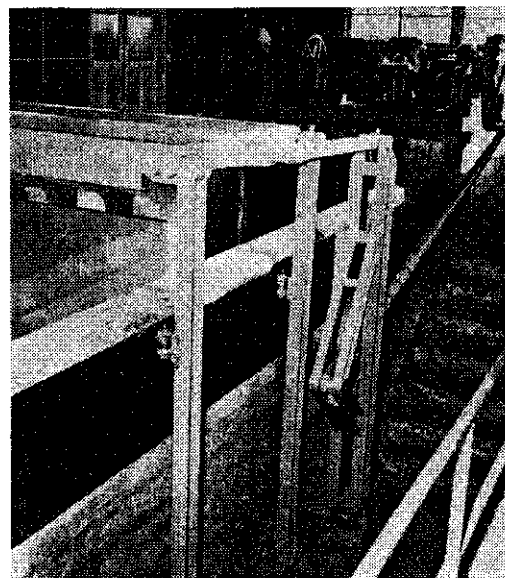


写真-2 造波機リンク機構

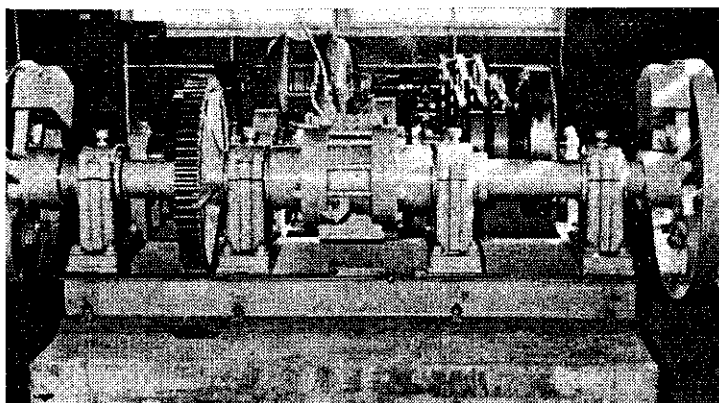


写真-3 造波機クランク偏心機構

操作により同一量同速度でかえられよう機構を考えた。
図-5 がその構造を示す。

クランクホイールのついているシャフト③は中空になっており、その中を両端にピニオン⑩と中央にウームギヤ⑨をもつた斜線で示した軸⑪が通っている。いまハンドルボックス⑭についているハンドル軸⑬を回転するとウームギヤ⑨と⑫により軸⑪が回転し、両ピニオン⑩が回転する。このピニオン⑩には、クランクホイール③に軸③で取付けられた偏心用歯車②がかまされてあり、ピニオン⑩の回転に伴つてこの歯車②が回転し、クランク軸⑪が点線で示した⑪'の位置に移動し偏心量が変わる。軸③の回転量によつて⑪'の位置は偏心量 0 から最大量 50 cm の間任意の位置に設定される。このままの状態で運転してもよいが安全をみてボルト⑮で固定しておく。この機構により、クランクを

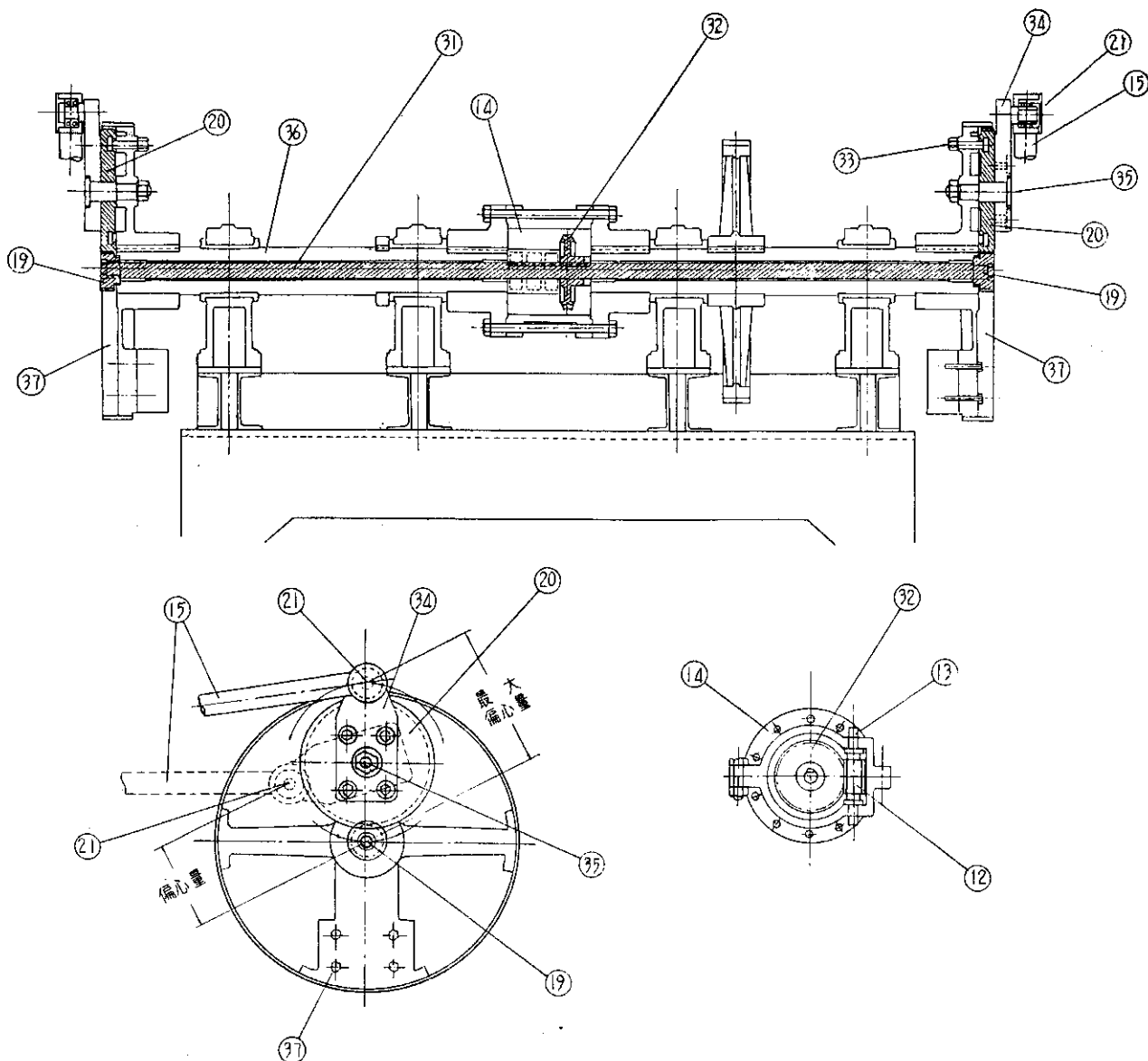


図-5 クランク、偏心機構

